

# 地震時における地盤の動特性評価法について

——金沢平野を対象に——

北浦 勝\*, 池本 敏和\*

## Method of Evaluation of Dynamic Characteristics of Ground during Earthquake

——Case Study in KANAZAWA Plain ——

Masaru KITaura and Toshikazu IKEMOTO

It is very important to evaluate the dynamic properties of surface ground in discussing the aseismatic natures of structures during earthquakes. There are two methods to evaluate them; i. e., one of them is the measurment of microtremor and Bouguer anomaly, and the other is the analysis based on the multiple reflection theory.

In this paper, authors measured the microtremor in KANAZAWA plain with attention to the predominant frequency. Spectral analysis was also carried out using the multiple and the equivalent multiple reflection theories. On the other hand, to analyze the underground structure analysis, gravity anomaly is used in the geophysical field. The relationship between damage ratio in 1948 FUKUI earthquake and gravity anomaly in FUKUI plain was already investigated by other researchers. Using these data, authors discussed the relationship between damage ratio, predominant frequency and Bouguer anomaly. In conclusion, it became clear that the dynamic properties of ground in KANAZAWA plain was able to evaluated by some methods from the aseismatic engineering point of view.

### 1. ま え が き

過去の多数の地震災害記録は、ほぼ同じ地域に建っているにもかかわらず構造物の被害率は異なることを示している。これは構造物自体の特性と入力地震動を伝達させる地盤の特性が異なるからであると考えられる。また、構造物の耐震性を扱う振動数領域においては、地震動は地表層近傍の影響を強く受けると言われている。地表層近傍の動特性を取り扱う方法には、常時微動測定、P-S検探、ボーリング調査など実測による方法と、波動理論、有限要素法などによる解析的方法とがある。ボーリング調査は、重要構造物の建設の際には現在必ず用いられるが、これにかかる費用は建設費中のかなりの部分を占める。

他方、解析的方法を用いた研究も最近では多く行な

われ、有益な結果が得られている<sup>1)</sup>。このとき、地盤中のS波速度には間隙水の影響が直接に関与しないこと、せん断振動の仮定が現象を良く説明していること、従来の震害の多くはS波を考えることによって説明されることながら、一般には地盤の動力学的特性の表現にS波速度が多用されている。特に水平な成層構造を持つと考えられる地表層近傍の場合には、S波の重複反射理論によって地盤の震動特性を明らかにする手法が金井ら<sup>2)</sup>によって開発された。地盤を構成する土の力学的性質は間隙比、拘束圧、飽和度、せん断波速度、ひずみ、などによって異なる。ひずみが $10^{-6}$ 程度以下だと土はほぼ弾性的性質を示し、動的性質はヤング率とポアソン比によって決定される。これ以上のひずみ、例えば地震時には十分ありうると考えられる $10^{-3}$

\*建設工学科

～ $10^{-2}$ においては土は動的な履歴特性を示すようになり、さらには破壊に至る。このようなことを考慮すると強震時の震動解析を行なう場合には金井らの線形理論では十分でなく、地盤は非線形特性を有していると考えていく必要がある。この非線形性を等価な線形と置き換えた研究が J. Lysmer らによって示された<sup>3)</sup>。これは実地震記録は与えられていないが、地表層近くのデータは存在する地盤において、卓越振動数を推定するには良い方法であろうと思われる。一方、地盤の強度、例えば密度を表現するのに、地球物理学的な現象を表わすパラメタの1つである重力ブーゲ異常が用いられることがある。これを工学的な構造物の被害に直接結びつけることは難しいが、何らかの地盤指標を示しているとは考えられる。

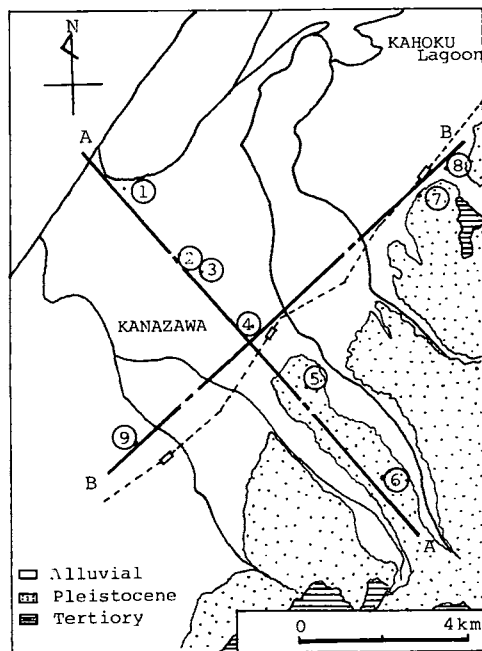
このような観点から本研究は金沢平野を対象に、常時微動測定、重力ブーゲ異常測定、線形および非線形重複反射解析の各手法を用いて地盤動特性を評価し、結果の比較考察から各手法の特徴について述べたものである。

## 2. 金沢平野の地質と常時微動測定点

金沢市周辺の地盤は、1) 洪積世の堆積岩からなる台地および丘陵、2) 洪積世末期の砂礫層と沖積世にできた扇状地および低地、3) 沖積層よりなる海岸砂丘、に分けることができる。これらの地質的特徴は地盤強度などに密接に関係しており、地質分布を区分すると Fig.1 (a)のごとくとなる<sup>4)</sup>。ここでの区分境界はおよその位置を示すものである。図中における A-A、B-B の断面図は同図(b)、(c)となる。これらから金沢平野では明らかに海岸側に向うほど沖積層が厚くなっていることがわかる。また地区的に見ていくと北部の河北潟干拓地は最近埋め立てられたばかりであり、十分に締め固まっていないために最も悪い地盤であろうと推定される。国鉄北陸線に沿った南西部は、新興住宅地域でありボーリング柱状図などから、沖積層が厚く分布しているが、砂礫を多く含んでいることがわかっていく。

1978 年宮城県沖地震では古くからの住宅地に比べ新興住宅地では多大な被害が報告された。その理由は造成されて未だ新しく、あまり良い地盤でなかったためや、地盤の卓越振動数が構造物のそれと一致したと考えられるためである。これらのことは金沢平野にもあてはまりそうである。なぜならば、周囲の地区は造成され

てまもないために地震時には破壊しやすく、また地盤の卓越振動数は構造物のそれと十分一致する領域にありそうだからである。この他、中心部でも沖積層が堆



(a) Plan

Fig.1 The geology and the observed sites of microtremor in KANAZAWA plain.

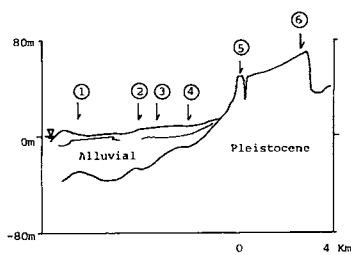


Fig.1 (b) A-A section

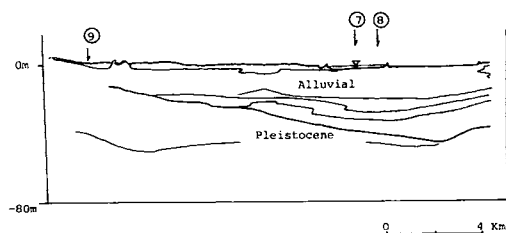


Fig.1 (c) B-B section

積している地区では、構造物によっては地震時安全性に問題がありそうである。

Fig.1 (a)には常時微動の観測地点も同時に示した。測点設定に当っては、測線が中心部を山の手側から海岸線側へ一直線に、また海岸線とは平行になるようにした。その理由は常時微動の卓越振動数は沖積層厚さと密接な相関性があると思われたからである。

### 3. 常時微動結果と家屋被害率の相関性

1948年福井地震における家屋被害率のコンター<sup>5)</sup>はFig.2のごとくである。Fig.2と福井平野における常時微動の結果<sup>6)</sup>との相関性について検討を加えるために、両図をFig.3の様に書き改めた。Fig.3において、明らかなピークが2.5 [Hz] 付近に見られるが、この振動数領域で構造物に共振があったのではないかと考えられる。また、Fig.2中には地質は示されていないが、同図より沖積層が厚く堆積している地域で明らかに被害率が大きくなっていることも認められる。

この結果を用いて金沢平野での被害率を予測するために、金沢平野における常時微動の測定、解析を前報<sup>7)</sup>と同様に実施した。すなわちピックアップにサーボ型

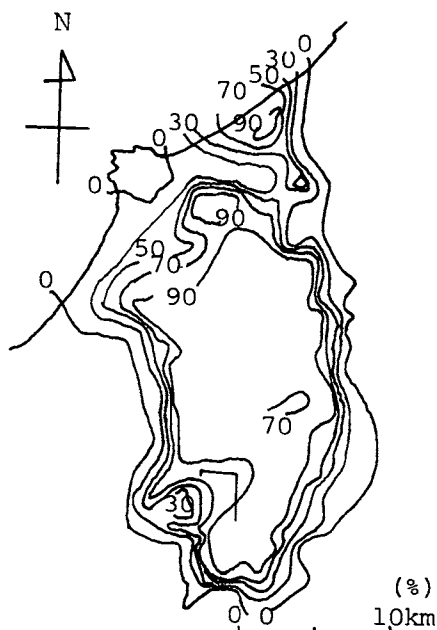


Fig.2 Damage ratio contour map in FUKUI plain.  
(1948, FUKUI Earthquake)

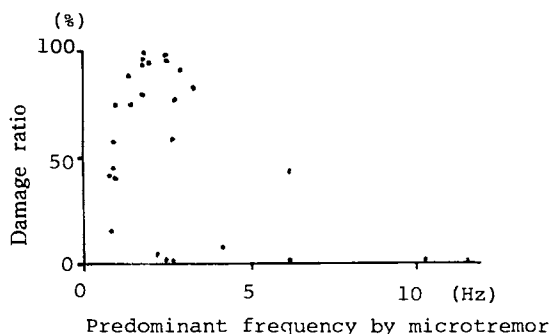


Fig.3 Relationship between Predominant frequency and Damage ratio.

加速度計を用い、アンプで増幅したのちデータ・レコーダに収めた。持ち帰ったデータは、さらにアンプで増幅させて、20 [Hz] 以上をロー・パス・フィルターでカットし、A-D変換器によってデジタル化させてミニコンに入力した。

デジタル・データが定常過程であるかどうかを確認するために、サンプリング時間を10[sec], 40[sec]と変化させて解析を行なったが、標本記録時間内ではスペクトルにはそれほど顕著な非定常性を見いだせなかったために、ここではサンプリング時間として10[sec]を採用した。また、高速フーリエ変換によって得られたスペクトルにはスペクトル・ウィンドウにより平滑化を図った。

すべての観測点での結果をFig.4に示す。地震時には1次のせん断振動が卓越するといわれていること、1次のせん断振動は構造物の破壊に直接関与することなどから、1次の卓越振動数に注目して常時微動を覚えていけば家屋被害率と良い対応を示すと考えられる。

金沢平野における常時微動観測結果を基にA-A line, B-B lineについて考察してみる。A-A line上での結果は、明らかに沖積層が厚くなれば卓越振動数が低くなっていく傾向が見られ、比較的良好な相関性を示していると言えよう。一方、B-B lineでは沖積層厚さは各観測点を比べてもさほどの差異はなく、従って卓越振動数においても先のような傾向は見られない。これらのことは沖積層厚さと常時微動の地盤の卓越振動数は相関があるといわれていることと一致している。

ところで、道路橋設計示方書に決められている地盤種別と常時微動による地盤の卓越振動数との関係は

Table 1 Relationship between group of ground condition and predominant frequency evaluated by microtremor.

group	Predominant frequency evaluated by microtremor. $f$ (Hz)
1	$f \cong 6.0-6.5$
2	$6.0-6.5 \cong f \cong 2.3-2.8$
3	$2.3-2.8 \cong f \cong 1.4-1.8$
4	$1.4-1.8 \cong f$

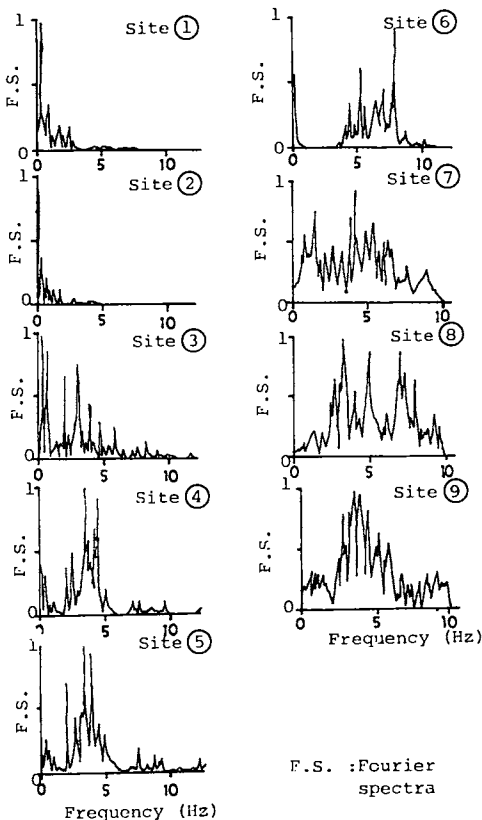


Fig.4 Results of microtremor. (All sites)

Table 1 のようである。この地盤種別は 1 種から 4 種へと数字が増すにつれて、悪い地盤を表わしていると考えられる。Table 1 を参考にして金沢平野の地盤動特性を評価すると、沖積層が厚い北部側で最も耐震的に不利な地盤であると言える。しかしこれらは常時微動測定そのものもっている不明な点、たとえば常時微動を生じさせる入力の変動数特性が常時微動に反映

している可能性など、をある程度無視した地盤評価ではあるが、相対的な尺度とはなりえているものと考えられる。

#### 4. 線形と等価線形重複反射理論による金沢平野の地盤動特性評価

常時微動観測点近傍およびその他での 1 km メッシュごとのボーリング柱状図を基に地盤のモデル化を行ない、線形重複反射理論を用いて金沢平野の地盤動特性評価を試みた。この理論では地盤を線形の範囲で扱っているために、3. における常時微動結果と同程度の卓越振動数を示すと予想される。

常時微動時の地盤は  $10^{-6}$  程度のひずみを有しているために十分線形の範囲にあると言える。しかし、破壊の地震時には  $10^{-3}$  以上のひずみ領域に至るので、非線形地盤振動を取り扱う必要があるが、ここでは非線形振動を等価な線形と置き換えて解析を実施した。つまり、地盤のひずみ程度によって、せん断弾性係数および減衰定数を変化させて取り扱った。

##### 1). 線形重複反射理論による地盤動特性

金沢市周辺のボーリング柱状図を用いることにより地盤のモデル化を行なった。モデル図の一例を Fig.5 に示す。縦方向に堆積深さをとり、図中の各パラメータはそれぞれ種別、平均せん断波速度、平均単位体積当りの重量を表わしている。基盤面における平均せん断波速度は 500 [m/sec]、平均単位体積当りの重量は 2.2 [g/cm<sup>3</sup>] と仮定して解析した。結果のスペクトル密度の値が最も卓越している振動数に注目して整理を行なえば、Fig.6 のようなコンターを引くことができる。Fig.6 は 3. で述べた常時微動結果とかなり良い一致をしていると思われる。つまり解析した範囲内では、山の手側より海岸側に向けて地盤の卓越振動数が低くなっていることは海岸側の地盤があまり良くないこと

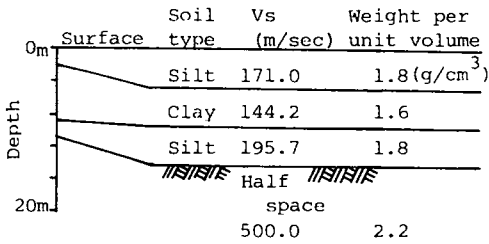


Fig.5 Soil deposit. (site ④)

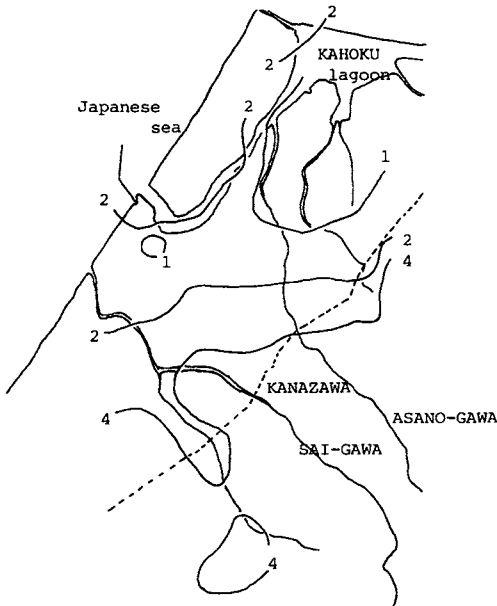


Fig.6 Predominant frequency contour in KANAZAWA plain by multiple reflection theory.

を示唆している。また、Fig.1(a)におけるB-Bline上の各観測点では、卓越振動数に顕著な変化は認められず、常時微動による地盤の卓越振動数の傾向との間に良い相関性が見られる。

## 2). 等価線形重複反射理論による地盤動特性

1). で作成した地盤モデルを用いて等価線形重複反射解析をした。実際の地震時には地盤は非線形領域に入るために、ひずみ振幅の大きさによって地盤の各パラメータは時々刻々と変化する。本解析ではSeed-Idrissらが提案している調和波入力に対するせん断弾性係数および減衰定数とせん断ひずみ振幅との関係を表わす土の動的応力-ひずみ関係<sup>8)</sup>を用いた。また、入力地震

波が非定常調和振動である場合、最大せん断ひずみ振幅の0.5倍が等価な調和波のひずみ振幅とみなしうることができる<sup>9)</sup>といわれていることを利用して、基盤入力地震波に一樣なスペクトルを持つランダムな波を入射させた場合の応答計算を実施した。入力の最大加速度は100 galとした。結果をFig.7のごとき各層境界部における加速度記録および掲載はしていないが周波数伝達関数として表わした。

Fig.8は各観測点におけるモデル地盤を用いて解析を行なった結果であり、線形重複反射理論による地盤の卓越振動数と等価線形重複反射理論によるその比

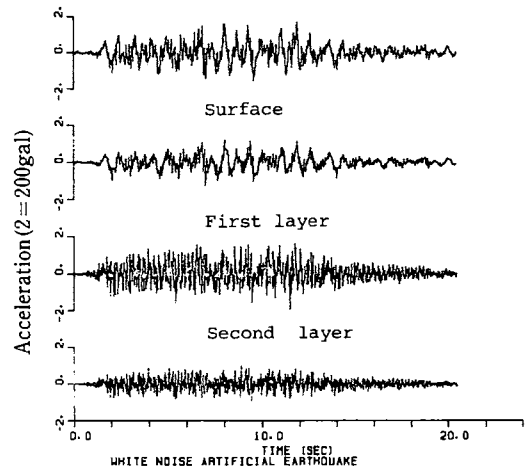


Fig.7 The acceleration records of each layer. (Site ④)

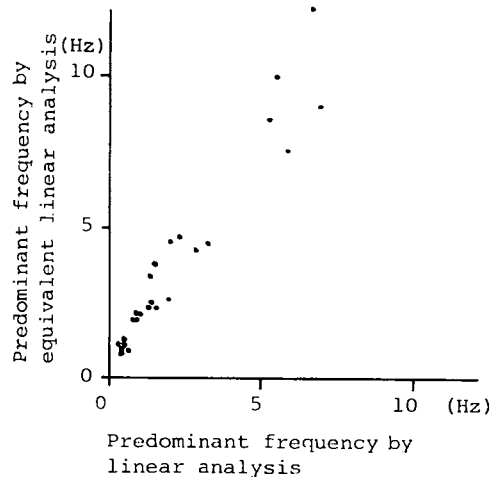


Fig.8 Relationship between linear analysis and equivalent linear analysis.

較図である。この図は明らかに等価線形重複反射理論より求まる解の方が、線形重複反射理論に比べて低振動数側、つまり構造物によっては不利な振動数を与えていることを示唆している。

以上をまとめると次のようになる。すなわち、実地震の際の地盤の卓越振動数を等価線形重複反射理論を用いてある程度の精度で推定できると考えるならば、Fig.8において等価線形重複反射理論の結果は線形重複反射理論の結果と直線的な傾向を示していることや、3.での常時微動による地盤の卓越振動数は線形重複反射理論より求まる卓越振動数と同程度の値を示していることながら、地盤動特性評価の方法として常時微動は有意であろうと考えられる。言いかえるならば、相対的な地盤の判定は常時微動によって推定できるということになろう。

### 5. 地盤動特性と重力異常

地盤の地下構造を重力値をもって評価しようとする方法がある<sup>10)</sup>。これは、ある地域での地殻構造が不均一であるならば、重力ブーゲ異常として変化が表われることを利用して、地盤の密度を明らかにしようとするものである。

重力ブーゲ異常値の定義は式(1)で表わされる。

$$\Delta g'' = g_{OB} - g_{ST} + \beta H - 2\pi\rho GH + T \quad (1)$$

ここで  $g_{OB}$  : 地表面での観測重力値,  $g_{ST}$  : ジオイド面での重力値,  $H$  : ジオイド面から地表面の高さ,  $\beta$  :  $0.3086[\text{mgal/m}]$ ,  $\rho$  : 地殻の平均密度,  $G$  : 万有引力定数 ( $6.672 \times 10^{-8} [\text{cm}^3/\text{g}]$ ),  $T$  : 地形補正值, をそれぞれ表わす。また,  $g_{ST}$  は  $\varphi$  (緯度) の関数として式(2)のように与えられる。

$$g_{ST} = 978.03185 (1 + 0.005278895 \sin^2 \varphi + 0.000023 \sin^4 \varphi) \quad (2)$$

式(1)における高度補正の項はフリーエア異常と言われており、式(3)のごとくなるため、

$$\Delta g' = g_{OB} - g_{ST} + \beta H \quad (3)$$

結局式(1)は、

$$\Delta g'' = \Delta g' - 2\pi\rho GH + T$$

で表わされる<sup>10)</sup>。

1948年の福井地震による家屋被害率と重力ブーゲ異常の研究は河野らによって既に行なわれている<sup>11)</sup>。その結果をもとに検討を加えていくと次のようである。重力ブーゲ異常値が小さいということは地殻構造の平均密度が低いということを意味するので、工学的な見地からは地盤が軟弱であるということであろう。従って、地震時には大きな変位が生じ、破壊領域に至ると予想できる。Fig.9<sup>11)</sup>は重力ブーゲ異常のコンターを示しており、Fig.2で示したコンターと比較的似た傾向にあるといえよう。このことは局地的な地盤の性質を重力ブーゲ異常を基にある程度推定することが可能であることを示唆している。Figs.2, 9によれば重力ブーゲ異常の低地域において家屋被害率の高い値を示している。さらに常時微動から求められている地盤の卓越振動数をも考慮に入れて整理するとFig.10のようになる。高い振動数で高い重力ブーゲ異常の場合は家屋被害率は低く、また、低い振動数で低い重力ブーゲ異常の場合には、ほとんど100%になっている。これらは前述したことと良い対応を示していると考えられる。しかし、低振動数領域で高い重力ブーゲ異常値を示しているにもかかわらず高い家屋被害率を有する群

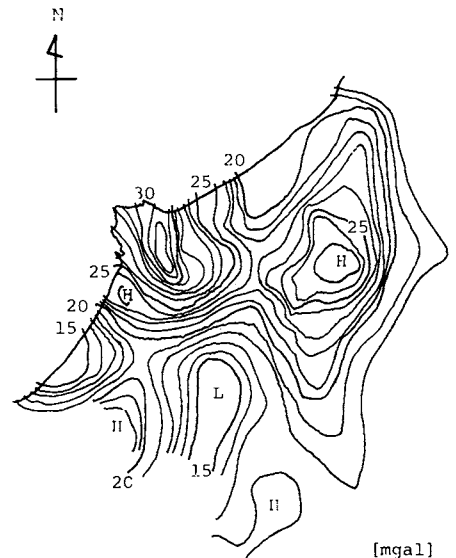


Fig.9 Bouguer anomaly contour in FUKUI plain.

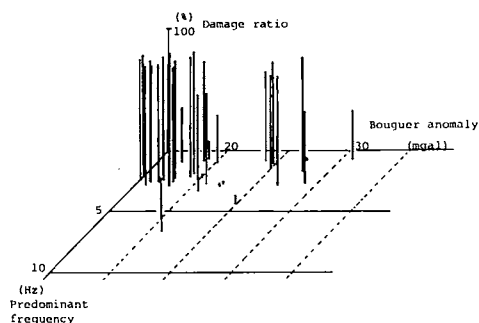


Fig.10 Tripartite relationship between Predominant frequency, Bouguer anomaly and Damage ratio.

が存在する。この理由としては次の点が考えられる。

1) 複雑な地殻構造をした堅い地質が地表面近くまで分布している。2) 震源が内陸部であったために強力な地震となり、地盤の良否に左右されることなく、ほとんどの家屋が倒壊した。いずれにしてもその詳細なところはまだわかっていないために、今後さらに検討を加えていく必要があろう。

次に、金沢平野における線形重複反射理論より求めた地盤の卓越振動数と重力ブーゲ異常<sup>4)</sup>との関係を比較検討する。卓越振動数は Fig.6 に示したコンターで表現できると考えられる。一方、重力ブーゲ異常のそれは Fig.11 のようになり、結論としてはあまり良い一致をしていないと言える。Fig.6, 11 を比べると線形重複反射理論を用いた結果は、地域的に見て重力ブーゲ異常よりも細やかに地盤動特性を評価していると考えられる。その理由は重力ブーゲ異常を用いた評価では、測定条件の誤差、補正誤差などを含めて考えれば、Fig.11 で表わされる程度のコンターが實際上、意味をもつと思われる。この図においては金沢市内では 0 mgal

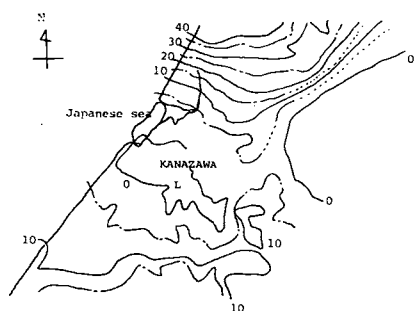


Fig.11 Bouguer anomaly contour in KANAZAWA plain.

で全て覆われてしまうが、線形重複反射理論の方はそれをさらに細かく区分けしている。

しかし、重力ブーゲ異常を地盤動特性評価に用いる際に、式(1)の定義とは別に、例えば洪積層上端での重力値を測定するか推定して沖積層厚さまでしか考慮しない重力異常値が出せれば、その結果は線形重複反射理論の結果とより合うと予想されるが、これは今後の課題である。

## 6. ま と め

これまで述べてきたことをまとめると次のようである。

- 1) 常時微動による地盤の卓越振動数は沖積層の堆積厚さと密接に関与している。つまり堆積厚さが深くなれば地盤の卓越振動数は全体的に低振動数側に移動することが一般に理論上予想されているが今回の実測でも実証された。
- 2) 常時微動による地盤の卓越振動数は線形重複反射理論の結果とほぼ一致している。
- 3) 実際の地震時での地盤の卓越振動数が等価線形重複反射で推定できるならば、常時微動の結果を用いて地震時の地盤の卓越振動数を求めることが可能である。
- 4) 重力ブーゲ異常は測定も簡単で地盤判定の良いパラメタと考えられるが、家屋被害率を求める際の関数としては今後さらに検討の余地を含んでいると思われる。

本研究においては、地盤動特性のパラメタとして地震時での地盤の卓越振動数のみに注目をして、金沢平野を対象に考察をおこなってきた。しかし、もうひとつの重要なパラメタである減衰定数を把握する必要がある。線形構造系の応答観測結果を用いて、系の固有周期はかなりの精度で推定できるものの減衰定数の推定には高い不確実性が伴っている。実地震を対象とする耐震工学の分野において、地盤の減衰定数を今後明らかにする必要がある。

## 謝 辞

本研究を実施するに当たり、始終助言をいただいた本学部建設工学科の小堀為雄教授、実験と解析に助力と助言をいただいた宮島昌克助手、重力異常のことについて教えていただいた理学部地学科の河野芳輝助教授

ならびに数値計算を全面的に助けてくれた元学部生  
宮西康之氏(現㈱セキスイハウス), および計算機全般  
を教えていただいた金沢大学計算機センターの山下邦  
弘技官, 実験・測定に当って全面的に協力された建設  
防災工学講座の諸氏に深く感謝の意を表する。

#### 参 考 文 献

- 1) I. Herrere and E. Rosenblueth: Response Spectra on Stratified Soil, 3th WCEE, vol. 1, pp. 1-44~61, 1965.
- 2) Yoshizawa S., T. Tanaka and K. Kanai: Some Features of strong Underground Earthquakes Motions Computed from Observed Surface Records, B. E. R. I., vol. 46, 1968.
- 3) J. Lysmer, et. al.: A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites, Report No. EERC 72-12, Col. of Eng., Univ. of Calif. Berkeley, 1972.
- 4) 石川県地盤図編集委員会: 石川県地盤図, 1982.
- 5) 宇佐美龍夫: 日本被害地震総覧, 東京大学出版会, p. 335, 1975.
- 6) K. Kanai, et. al.: On Microtremors, X, B. E. R. I., vol. 44, pp. 645-696, 1966.
- 7) M. Kitaura and T. Ikemoto: Evaluation of Dynamic Properties of Surface Layers Using Microtremor (Case study in ISHIKAWA Prefecture), Memoirs of the Faculty of Technology, KANAZAWA Univ., vol. 15, No. 2, 1982.
- 8) H. Seed and I. Idriss: Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analysis, Report No. EERC 70-10, Col. of Eng., Univ. of Calif. Berkeley, 1970.
- 9) 土岐憲三: 構造物の耐震解析, 2 章, 技報堂, 1981.
- 10) 萩原幸男: 地球重力論, 9 章, 共立全書, 1978.
- 11) 河野芳輝他: 福井平野における重力異常と福井地震災害との関係, 地震, 第 2 輯, 第 34 巻, pp. 377~383, 1981.
- 12) 土岐憲三・佐藤忠信: 時系列理論による強地震動特性の推定, 京大防災研究所年報, vol. 21B, pp. 25~36, 1978.